

引用格式: ZHANG Ruidi, DUAN Yaxuan, DA Zhengshang. High Quality Bessel Beam Array Generation Method Based on Computer Generated Holography[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(9):0909001

张睿迪,段亚轩,达争尚. 基于计算全息的高质量贝塞尔光束阵列产生方法[J]. 光子学报, 2023, 52(9):0909001

# 基于计算全息的高质量贝塞尔光束阵列产生方法

张睿迪<sup>1,2</sup>, 段亚轩<sup>1,3</sup>, 达争尚<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 先进光学仪器研究室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 西安市高功率激光测量技术与仪器重点实验室, 西安 710119)

**摘要:**针对传统计算全息法生成的贝塞尔光束阵列均匀性差, 能量利用率低的问题, 提出了两种计算全息法, 分别可以生成高质量的平行、发散贝塞尔光束阵列。提出多轴锥透镜相位并行拼接法, 通过提高窗口的“口径利用率”, 有效降低了光场的背景噪声, 提高了能量利用率, 仿真结果表明, 所产生的 $3 \times 3$ 平行贝塞尔光束阵列均匀性为 98.94%, 衍射效率为 78.12%; 提出多透镜和轴锥透镜相位叠加法, 通过多个透镜和轴锥透镜相位叠加来调控贝塞尔光束的数量和位置, 透镜相位对贝塞尔光束起到聚焦的作用, 可以在透镜后焦面附近得到中心光斑直径缩小的贝塞尔光束阵列, 仿真结果表明, 所产生的 $3 \times 3$ 发散贝塞尔光束阵列均匀性为 97.95%, 衍射效率为 79.23%。实验采集了贝塞尔光束阵列沿传输方向 120 mm, 130 mm, 140 mm 位置处的图像, 与仿真结果高度一致。相比于传统方法, 本文所提方法产生的平行、发散贝塞尔光束阵列均匀性分别提高了 2.97% 和 4.70%, 衍射效率分别提高了 48.22% 和 54.75%。

**关键词:**贝塞尔光束阵列; 空间光调制器; 相位叠加法; 计算全息图; 飞秒激光加工

中图分类号: O439

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235209.0909001

## 0 引言

自 1987 年 DURNIN J<sup>[1]</sup> 提出具有无衍射特性的贝塞尔光束以来, 贝塞尔光束就一直是学者们研究的热点, 在激光加工<sup>[2-4]</sup>、光学显微<sup>[5]</sup>等众多领域中大显身手。特别是在工业加工领域, 贝塞尔光束因其长焦深的特点, 在孔型结构的制备中发挥着重要的作用。然而对于大面积周期性的结构来说, 单束激光逐点扫描加工的方式制约着其在工业中的应用, 为了提高加工效率, 并行加工技术应运而生。随着光场调控技术<sup>[6]</sup>的发展, 飞秒激光直写技术焕发了新的生命。通过将设计好的全息图加载到空间光调制器上, 就可以对入射光进行调制, 从而灵活地产生期望的光场分布。

利用空间光调制器可编程的特性, 可以动态地调制出不同数量、间距和强度的贝塞尔光束阵列。2011 年, BOWMAN R 等<sup>[7]</sup> 通过多个轴锥透镜相位叠加的方法生成了计算全息图, 将其加载到空间光调制器上, 产生了 $3 \times 3$ 的贝塞尔光束阵列。相比于最早的环形孔径法, 该方法提高了入射光的能量利用率。GARCIA-MARTINEZ P 等<sup>[8]</sup> 利用达曼光栅和轴锥透镜相位叠加的方法来产生贝塞尔阵列光束, 然而得到的光场并非是平行贝塞尔光束阵列, 并且光场的信噪比较低。近年来, 还有许多研究者利用超表面作为高效、紧凑的平台, 来集成达曼光栅和轴锥透镜全息图的功能<sup>[9-10]</sup>, 虽然也能实现贝塞尔光束阵列, 但是这种方法有着成本高且工艺复杂的问题。

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2021YFC2203501), 国家自然科学基金(No. 61705254), 陕西省重点研发计划(No. 2020GY-114)

第一作者: 张睿迪, zhangruidi20@mailsucas.ac.cn

通讯作者: 达争尚, dazhengshang@opt.ac.cn

收稿日期: 2023-03-10; 录用日期: 2023-04-20

<http://www.photon.ac.cn>

本文提出了多轴锥透镜相位并行拼接法、多透镜和轴锥透镜相位叠加法来产生贝塞尔光束阵列,并将这两种方法与轴锥透镜相位串行叠加法、达曼光栅和轴锥透镜相位叠加法进行比较,分别通过仿真和实验的手段得到这四种方法在空间中传播的衍射图样。结果表明,利用本文所提方法产生的贝塞尔光束阵列有着更高的均匀性和信噪比,本文所提方法对高质量贝塞尔光束阵列的生成提供了新的思路。

## 1 理论

### 1.1 轴锥透镜相位

本文利用空间光调制器可编程的特性,模拟轴锥透镜的相位图,并结合角谱衍射方法,实现了贝塞尔光束中心光斑和无衍射距离等参数的动态灵活调制,贝塞尔光束的中心光斑可由半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)表示。高阶贝塞尔光束的相位<sup>[1]</sup>表达式为

$$\varphi_{\text{Bessel}} = \begin{cases} 2\pi r/r_0 + n\varphi & r \leq R \\ 0 & r > R \end{cases} \quad (1)$$

式中, $r_0$ 表示轴锥透镜的半径, $2\pi r/r_0$ 表示轴锥透镜的相位, $n\varphi$ 表示螺旋相位, $n$ 为拓扑荷数,代表 $n$ 阶贝塞尔光束, $R$ 表示加载在空间光调制器上的全息图半径。

将设计好的全息图加载到空间光调制器上,入射光为高斯光束,则空间光调制器反射后的光场可由式(2)表示为

$$U_{\text{Bessel}} = \begin{cases} A_0 \exp(-r^2/\omega^2) \exp(-i(2\pi r/r_0 + n\varphi)) & 0 < r \leq R \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $A_0$ 表示振幅,是归一化常数, $\omega$ 表示高斯光的束腰半径。

由式(2)得到的贝塞尔光束全息图和横向光场分布如图1所示。此时,贝塞尔光束的无衍射距离,即最大焦深 $Z_{\text{max}}$ 可由式(3)得到

$$Z_{\text{max}} = r_0 R / \lambda \quad (3)$$

由式(3)可知,用相位调制法产生贝塞尔光束时,当入射高斯光束的波长和束腰半径确定,贝塞尔光束的最大无衍射距离与轴锥透镜的半径 $r_0$ 呈正相关。

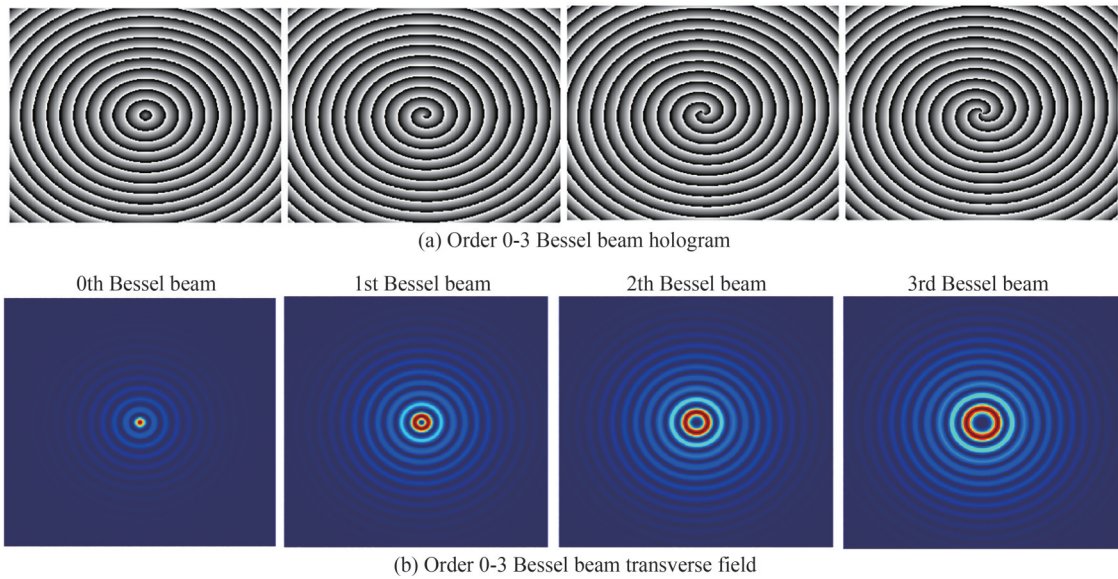


图1 0~3阶贝塞尔光束全息图和横向光场

Fig.1 Holograms of 0~3 order Bessel beams and transverse light fields

### 1.2 平行贝塞尔光束阵列产生方法

利用多个轴锥透镜相位叠加的方法来产生贝塞尔光束阵列,就是将多个轴锥透镜的复振幅相加,再取其相位来生成计算全息图,其基础单元是单个轴锥透镜的相位,由式(1)来表示。传统的相位串行叠加法一般是将多个轴锥透镜相位直接进行叠加,往往会带来很大的背景噪声,并且光场质量较差,为了解决这个问

题并提高窗口的“口径利用率”,本文提出多个轴锥透镜相位并行拼接的方法来产生高质量的平行贝塞尔光束阵列。下面将对串行叠加和并行拼接两种策略分别进行理论分析。

### 1.2.1 多个轴锥透镜相位串行叠加

串行叠加法是将观察面中能产生多个不同位置的贝塞尔光束相位直接叠加在一起,得到的计算全息图由式(4)表示为

$$\phi_{\text{array Bessel}} = \text{mod}_{2\pi} \left\{ \text{angle} \left[ \sum_{k=1}^m \exp(i \cdot \varphi_{\text{Bessel}}) \right] \right\} \quad (4)$$

式中,  $\text{mod}_{2\pi}(\cdot)$  函数表示返回  $2\pi$  的余数,  $\text{angle}$  是复振幅的相位参数,  $\varphi_{\text{Bessel}}$  是轴锥透镜的相位公式,  $m$  为贝塞尔光束的数量。

为了更直观的说明串行法的叠加原理,设  $\Delta x$  和  $\Delta y$  为零阶贝塞尔光束偏离观察面中心的  $x$  和  $y$  方向上的偏移量,因此贝塞尔光束在观察面的位置可由式(5)表示为

$$r_m = \sqrt{(x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2} \quad (5)$$

式中,当  $\Delta x$  和  $\Delta y$  都为 0 时,表示该零阶贝塞尔光束在观察面正中心。不同位置贝塞尔光束的全息图如图 2。

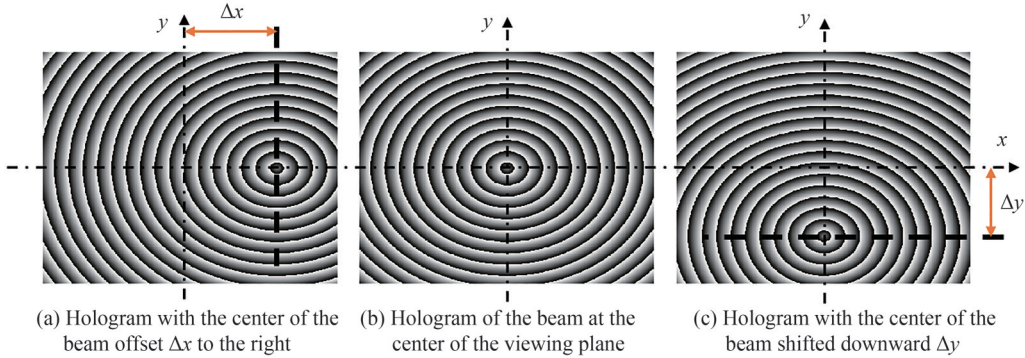


图 2 不同位置贝塞尔光束的全息图

Fig.2 Hologram of Bessel beams at different positions

### 1.2.2 多个轴锥透镜相位并行拼接

本文提出多个轴锥透镜相位并行拼接的方法,以  $3 \times 3$  的贝塞尔光束阵列为例,将观察窗口划分为 9 个小正方形,每个小正方形里放置一个轴锥透镜相位,最后组合成一个  $512 \times 512$  像素的相位图,原理如图 3 所示。

图 3 中,  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$  分别为采样点数  $171 \times 171$ 、 $170 \times 170$ 、 $172 \times 172$  的轴锥透镜全息图,横竖相加均为 512 像素,它们组合形成了  $512 \times 512$  像素的贝塞尔光束阵列全息图,每个贝塞尔光束的位置由轴锥透镜相位在全息图中的位置确定。

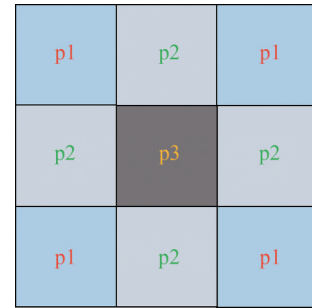


图 3 并行拼接法原理

Fig.3 Schematic diagram of parallel splicing method

## 1.3 发散贝塞尔光束阵列产生方法

将达曼光栅和轴锥透镜相位叠加,可以产生发散的贝塞尔光束阵列。阵列的阶数取决于达曼光栅的结构参数,通过查表法,可以快速获取达曼光栅相位转折点的数值,避免了耗时的运算。然而,该方法生成的贝塞尔光束阵列信噪比较低,光场的质量严重依赖于达曼光栅的结构设计,无疑增加了计算难度和时间成本。对此,本文提出了一种多透镜和轴锥透镜相位叠加的方法来产生高质量的发散贝塞尔光束阵列。下面将对达曼光栅和轴锥透镜相位叠加、多透镜和轴锥透镜相位叠加两种方法分别进行理论分析。

### 1.3.1 达曼光栅和轴锥透镜相位叠加

达曼光栅是在 1971 年由达曼最早提出的一种对称相位结构光栅,但是存在相位转折点多,效率低的

缺点,后来研究者们对达曼光栅结构进行改进,不仅大幅减少了一个周期内相位转折点的数量,还降低了达曼光栅制作难度。达曼光栅是一种傅里叶变换型分束器,将其置于傅里叶变换透镜前,经平面波照射之后,在透镜的后焦面(频谱面)可以得到等光强、等间距且具有一定分束比的光阵列分布。光栅的相位一般为0或 $\pi$ ,光栅周期归一化为1,达曼光栅分束比由相位转折点的位置控制,通过查找达曼光栅数值解的表可以快速获得。为了设计方便,通常先设计一个一维光栅结构,再将其在正交方向展开,即可得到二维达曼光栅。将达曼光栅和轴锥透镜相位进行叠加,可以生成贝塞尔光束阵列全息图,如图4所示。

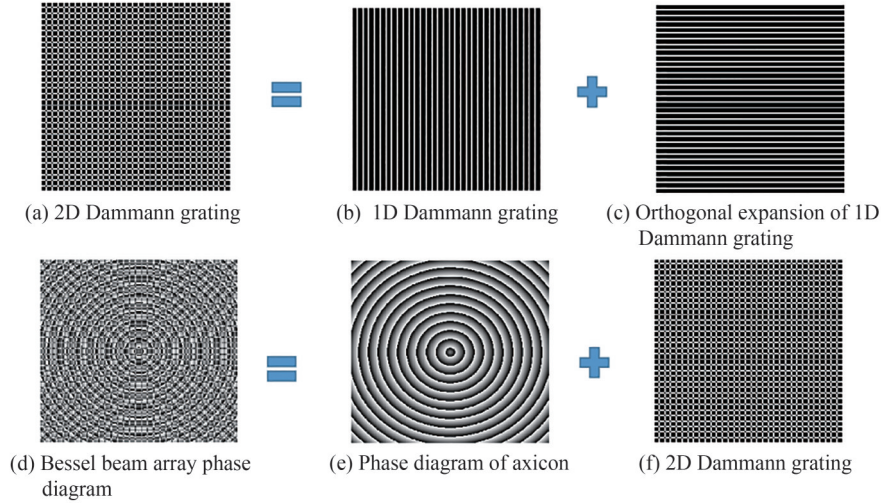


图4 达曼光栅和轴锥透镜相位叠加原理

Fig.4 Schematic diagram of Dammann grating and axicon phase superposition method

### 1.3.2 多透镜和轴锥透镜相位叠加

该方法首先利用多个透镜相位叠加的方法在观察面上产生多个焦点分布,再通过叠加轴锥透镜相位,将每个焦点的光束都调制为贝塞尔光束,从而形成阵列贝塞尔光束,该方法的关键在于多透镜相位叠加来生成位置可控的多焦点分布。

从几何光学的角度看,凸透镜对光束的会聚作用是因为光线经过透镜时发生了折射现象;从物理光学的角度看,凸透镜对光束的会聚作用主要是因为透镜相位因子产生的相位调制。一束平行光经过凸透镜就会在后焦面处会聚成一个焦点,凸透镜的相位公式为

$$\varphi(x, y) = \exp\left[-i\frac{k}{2f}(x_i^2 + y_i^2)\right] \quad (6)$$

式中, $f$ 为透镜的焦距,其取值与目标焦面的距离相关。 $x_i$ 和 $y_i$ 为目标焦平面中焦点的空间位置坐标。波数 $k = 2\pi/\lambda$ , $\lambda$ 为波长。

根据焦点在目标光场中的位置来设计计算全息图,焦平面中焦点的位置取决于 $x_i$ 和 $y_i$ ,焦平面在空间中沿 $z$ 轴传输方向的位置取决于 $f$ 。平面多焦点分布的实现步骤为:先确定焦平面在空间中的位置 $f$ ,再通过改变 $x_i$ 和 $y_i$ 的坐标,即可控制焦点在 $x-y$ 横平面中的位置,然后将这些具有不同焦点位置的透镜相位叠加,即可得到该焦平面多焦点分布的相位。最终贝塞尔光束阵列的计算全息图 $\phi_{\text{array Bessel}}$ 为

$$\phi_{\text{array Bessel}} = \text{mod}_{2\pi}\left\{\text{angle}\left\{\sum_{k=1}^m \exp\left\{i\left[\varphi_{\text{Bessel}} + \varphi(x, y)\right]\right\}\right\}\right\} \quad (7)$$

式中, $\text{mod}_{2\pi}(\cdot)$ 函数表示返回 $2\pi$ 的余数,angle是复振幅的相位参数, $\varphi(x, y)$ 为单个透镜的相位, $m$ 为平面焦点的数量, $\varphi_{\text{Bessel}}$ 是轴锥透镜的相位公式。

## 1.4 光场质量评估

为了更好地评估所提方法产生贝塞尔光束阵列的光场质量,本文分别计算了所提方法和传统方法所生成光束阵列的均匀度和衍射效率<sup>[12]</sup>。均匀度采用式(8)来表示

$$\mu = 1 - \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (8)$$

式中,  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$  分别为出射光平面中目标光束能量的最大值和最小值。

虽然纯相位型空间光调制器具有较高的衍射效率,但其本身的结构会不可避免的产生其余衍射级次的光,从而导致能量的损失,所以全息图的衍射效率也极其重要。全息图的衍射效率通常是指目标光场强度和入射光场强度的比值,由式(9)表示

$$\eta = \frac{I_{\text{target}}}{I_{\text{incident}}} \quad (9)$$

式中,  $I_{\text{target}}$  和  $I_{\text{incident}}$  分别表示目标光场强度和入射光场强度。

## 2 仿真

### 2.1 仿真参数

为了对比所提方法和传统方法产生的贝塞尔光束阵列的光场质量,本文设计了  $3 \times 3$  的贝塞尔光束阵列,利用 MATLAB 软件分别仿真出四种方法得到的贝塞尔光束阵列。

仿真设置的采样点数为  $512 \times 512$ , 像素大小为  $8 \mu\text{m}$ , 入射光为高斯光束, 波长为  $520 \text{ nm}$ , 束腰半径为  $2 \text{ mm}$ , 轴锥透镜的  $r_0 = 200 \mu\text{m}$ ,  $R = 1 \text{ mm}$ , 将全息图加载到空间光调制器后, 经过入射光照射, 即可用 CCD 在无衍射距离内观测到阵列贝塞尔光束, 光路示意图如图 5 所示。仿真达曼光栅所用的归一化相位转折点坐标为  $0.73526$ , 光栅结构尺寸为  $4.096 \text{ mm} \times 4.096 \text{ mm}$ , 光栅周期为  $0.126 \text{ mm} \times 0.126 \text{ mm}$ 。

### 2.2 仿真结果

采用所提方法和传统方法仿真得到的  $3 \times 3$  贝塞尔光束阵列计算全息图, 如图 6 所示。

用 MATLAB 软件对图 6 的计算全息图分别进行仿真, 得到所提方法和传统方法产生的贝塞尔光束阵列的衍射图样, 如图 7 所示。

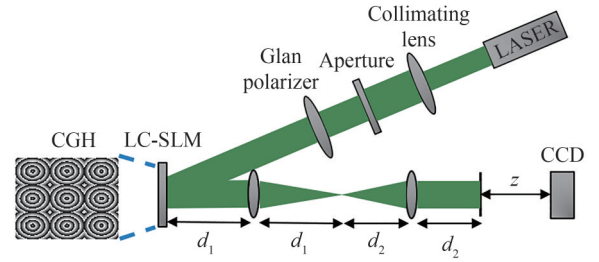
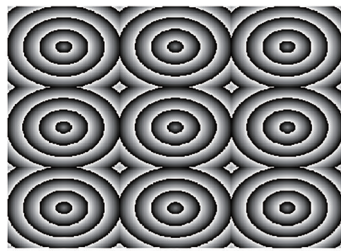
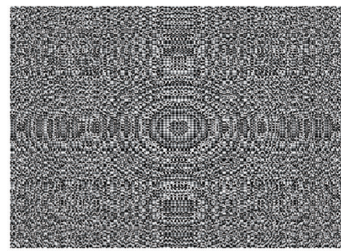


图 5 光路示意图

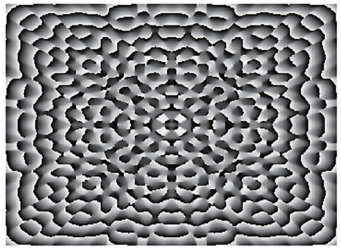
Fig.5 Schematic diagram of optical path



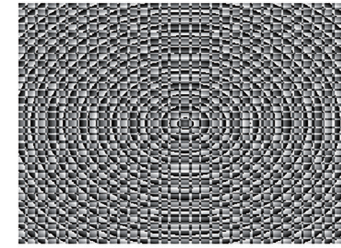
(a) Multi-axicon phase parallel splicer method (proposed)



(b) Multi-lens and axicon phase superposition method (proposed)



(c) Multi-axicon phase serial superposition method (traditional)



(d) Damman grating and axicon phase superposition method (traditional)

图 6 利用所提方法和传统方法得到的  $3 \times 3$  贝塞尔光束阵列全息图

Fig.6  $3 \times 3$  Bessel beam array hologram obtained by the proposed method and the traditional method

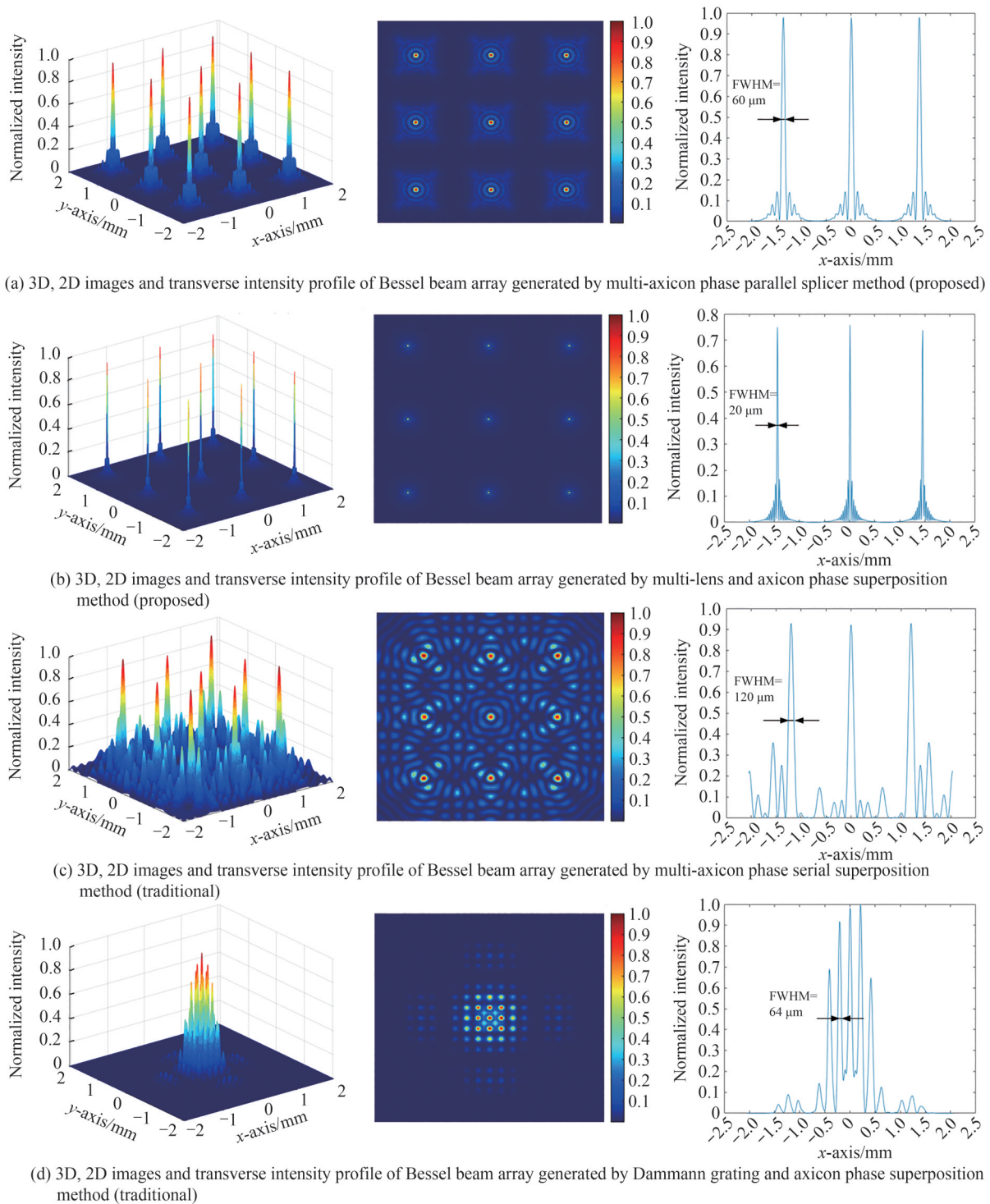


图7 所提方法和传统方法产生的贝塞尔光束阵列三维、二维图和横向光强剖面轮廓图

Fig.7 3D and 2D images and transverse profile of light intensity of Bessel beam array generated by the proposed method and the traditional method

从图7可以看出,多轴锥透镜相位并行拼接法产生的贝塞尔光束阵列具有良好的均匀性,而且背景干净,几乎没有“鬼影光斑”,且FWHM为 $60\ \mu\text{m}$ ,相较于轴锥透镜相位直接叠加的方法,光场质量有了很大的提升;多透镜和轴锥透镜相位叠加法生成的贝塞尔光束阵列背景较为纯净,且光束分布均匀,FWHM为 $20\ \mu\text{m}$ ,该方法所得的中心光斑直径最小,光场质量较好。分析原因是:由于加入了透镜相位,从而在频谱面之后的一段距离内得到一个微型贝塞尔阵列光束,凸透镜对零阶贝塞尔光束阵列起了缩小的作用;多轴锥透镜相位串行叠加法产生的贝塞尔光束阵列有较大的背景噪声,FWHM为 $120\ \mu\text{m}$ ,中心光斑直径较大,整

体光场质量较差;达曼光栅和轴锥透镜相位叠加法产生的阵列贝塞尔光束均匀性较差,FWHM为 $64\ \mu\text{m}$ ,目标光场周围分布数量较多、能量较大的杂散光束,且达曼光栅只能实现阵列式的光束分布,灵活性不足。

为了进一步观测贝塞尔光束阵列在自由空间传播时的光场,本文基于角谱衍射过程,模拟了它们各自沿 $z$ 轴传播时不同位置处的光场分布,如图8所示。为了便于观测它们的光场质量,模拟了它们各自的光强剖面轮廓图,如图9所示。

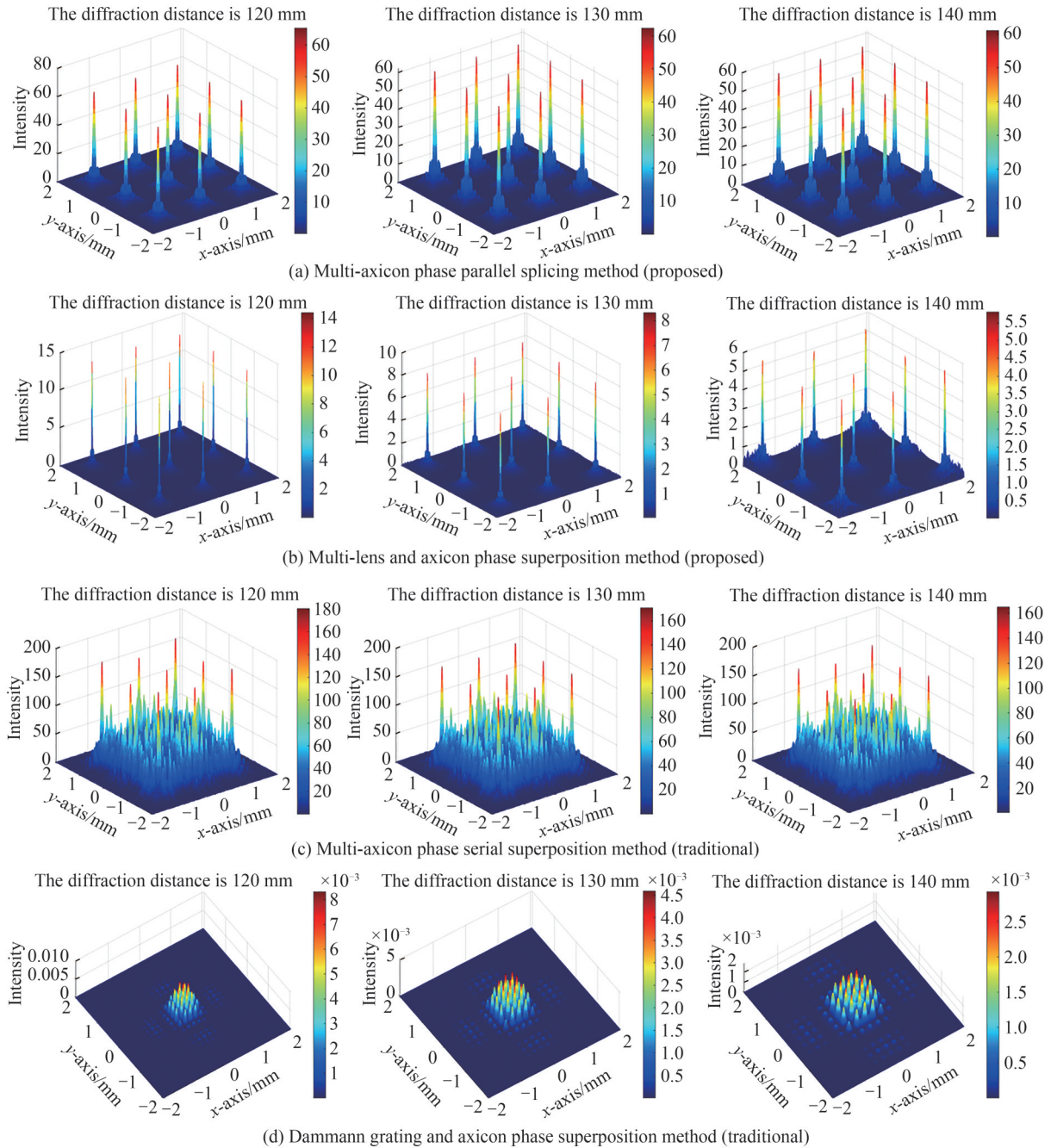


图8 所提方法和传统方法产生的贝塞尔光束阵列在沿传输方向120 mm、130 mm、140 mm位置处的衍射图样  
Fig.8 The diffraction pattern of Bessel beam array generated by the proposed method and the traditional method at 120 mm, 130 mm and 140 mm positions along the transmission direction

从仿真结果可以看出这四种方法的优劣:1)多轴锥透镜相位并行拼接法产生的贝塞尔光束阵列不仅均匀性好,而且没有明显的背景噪声,信噪比高,并且光束在无衍射距离内能保持几乎相同大小的光强,光束平行性保持良好;2)多透镜和轴锥透镜相位叠加产生的贝塞尔光束阵列均匀性好,且中心光斑直径最小,信

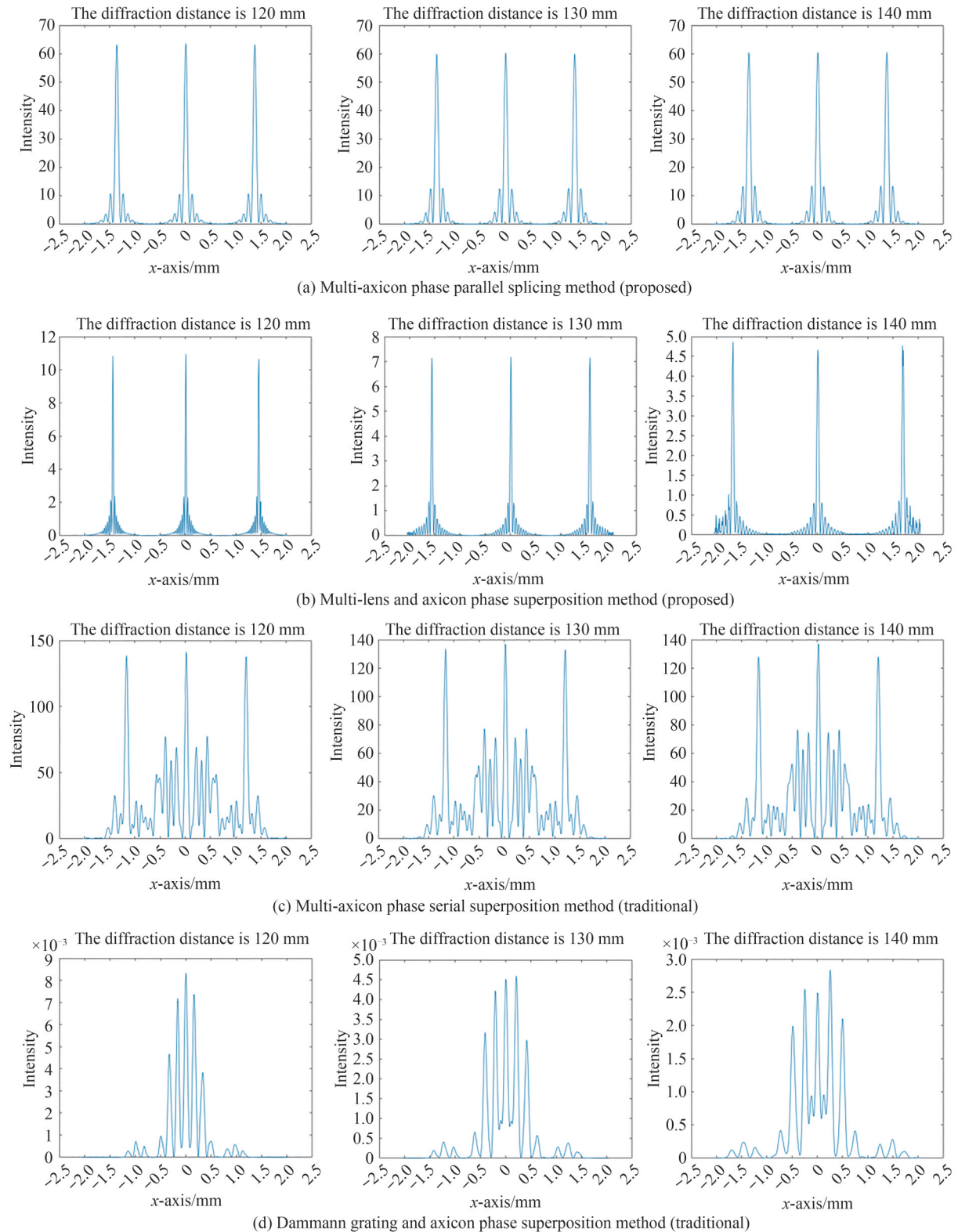


图9 所提方法和传统方法产生的贝塞尔光束阵列在沿传输方向120 mm、130 mm、140 mm位置处的光强剖面轮廓  
 Fig.9 The light intensity profile of the proposed method and the traditional method at 120 mm, 130 mm and 140 mm positions along the transmission direction

噪比较高,但是无衍射距离较小。原因是凸透镜对光束有会聚作用,得到的阵列贝塞尔光束相当于一个微型阵列贝塞尔光束,所以光束的中心光斑直径小,且产生的阵列贝塞尔光束不是平行贝塞尔光束阵列,随着衍射距离的增大,光束间距也会增大,呈发散状;3)多轴锥透镜相位串行叠加法得到的贝塞尔光束阵列光场



质量最差,背景区域杂散光强,信噪比低;4)达曼光栅和轴锥透镜相位叠加法产生的贝塞尔光束阵列效果并不好,光强很低,且背景杂散光较强,均匀性差。产生该结果的原因有两个,一是光栅本身就具有分光特性,因此造成了能量的极大损失,二是本文没有对模拟的达曼光栅结构参数进行优化,仅采用了已有的光栅数值解,所以仿真模拟的效果一般。

根据仿真所用的参数,利用式(3)计算得到的贝塞尔光束的最大无衍射距离为384.6 mm,为了观测贝塞尔光束阵列的最大无衍射距离,本文仿真了四种方法产生的贝塞尔光束阵列的轴向光场截面图,如图10所示。另外,根据式(8)和(9),计算了贝塞尔光束阵列在轴向120 mm位置处横向光场的均匀度和衍射效率,计算结果如表1所示。

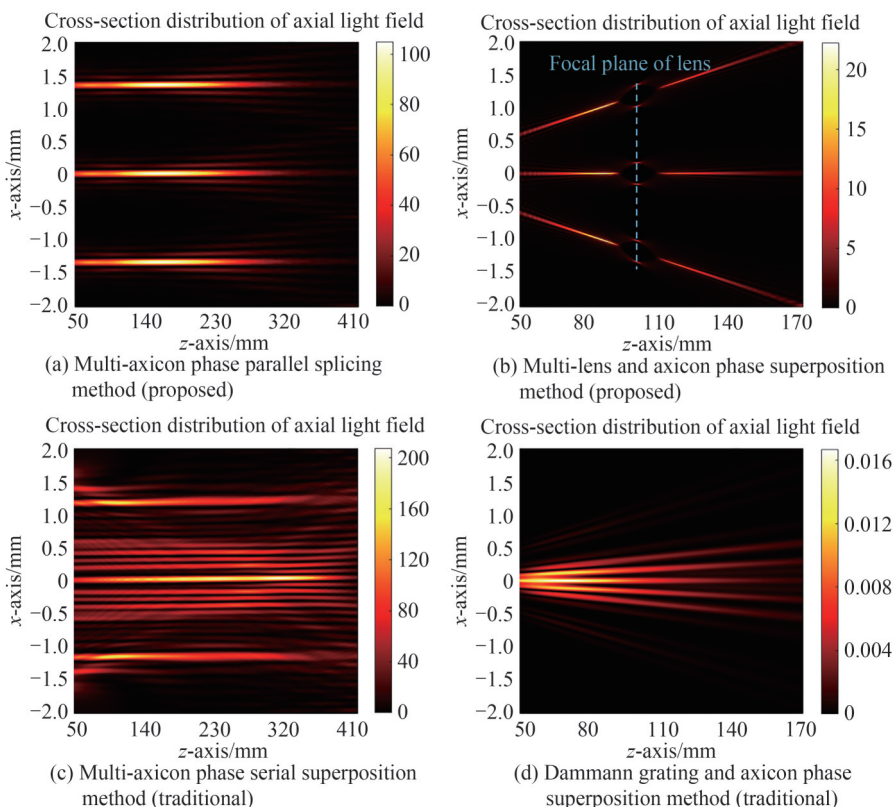


图10 所提方法和传统方法产生的贝塞尔光束阵列沿传输方向的截面光场分布

Fig.10 The sectional field distribution of Bessel beam array along the transmission direction generated by the proposed method and the traditional method

表1 所提方法和传统方法所产生贝塞尔光束阵列的最大无衍射距离、均匀度和衍射效率

Table 1 The maximum diffract-free distance, uniformity and diffraction efficiency of Bessel beam arrays produced by the proposed method and the traditional method

	Parallel method (proposed)	Multi lens superposition method (proposed)	Serial method (traditional)	Dammann grating superposition method (traditional)
$z$ (distance)	260 mm	60 mm	340 mm	80 mm
$\mu$ (uniformity)	98.94%	97.75%	95.97%	93.05%
$\eta$ (efficiency)	78.12%	79.23%	29.90%	24.48%

图10(b)中有部分截断的区域,原因是:该方法是利用多透镜和轴锥透镜相位叠加法产生的贝塞尔光束阵列,蓝线位置为透镜的焦面位置,所以该位置的光场分布为贝塞尔光束的傅里叶变换形式,即环状分布,贝塞尔光束的发散角可以通过改变多透镜相位中的位置坐标和焦距参数来控制。从表1可以看出,平行贝塞尔光束阵列的无衍射距离更长,发散贝塞尔光束阵列的无衍射距离较短。另外,相比于传统方法,所提方法产生的贝塞尔光束阵列背景更加纯净,因此有着更高的均匀性和衍射效率。

### 3 实验

为了验证仿真的结果,本文设计了实验来观测空间不同位置处贝塞尔光束阵列的光场分布,实验光路如图11所示。实验使用的反射型空间光调制器规格型号为HDSLM80R,分辨率为 $1\,920\times 1\,200$ ,像素大小为 $8\,\mu\text{m}$ ,刷新频率为60 Hz,波长范围为450 nm~1 550 nm,在波长范围内反射率为85%。CCD像素尺寸为 $7.4\,\mu\text{m}\times 7.4\,\mu\text{m}$ ,靶面大小 $1\,600\times 1\,200$ 。

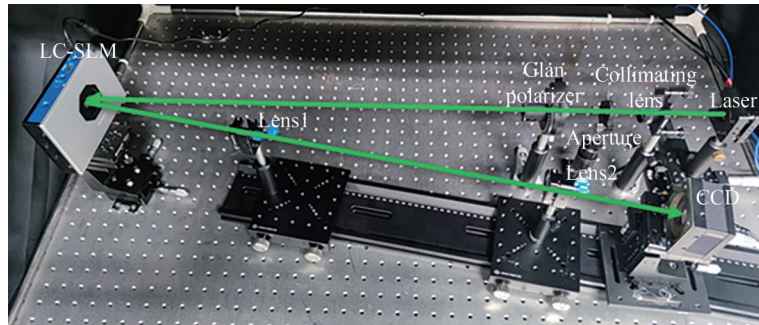
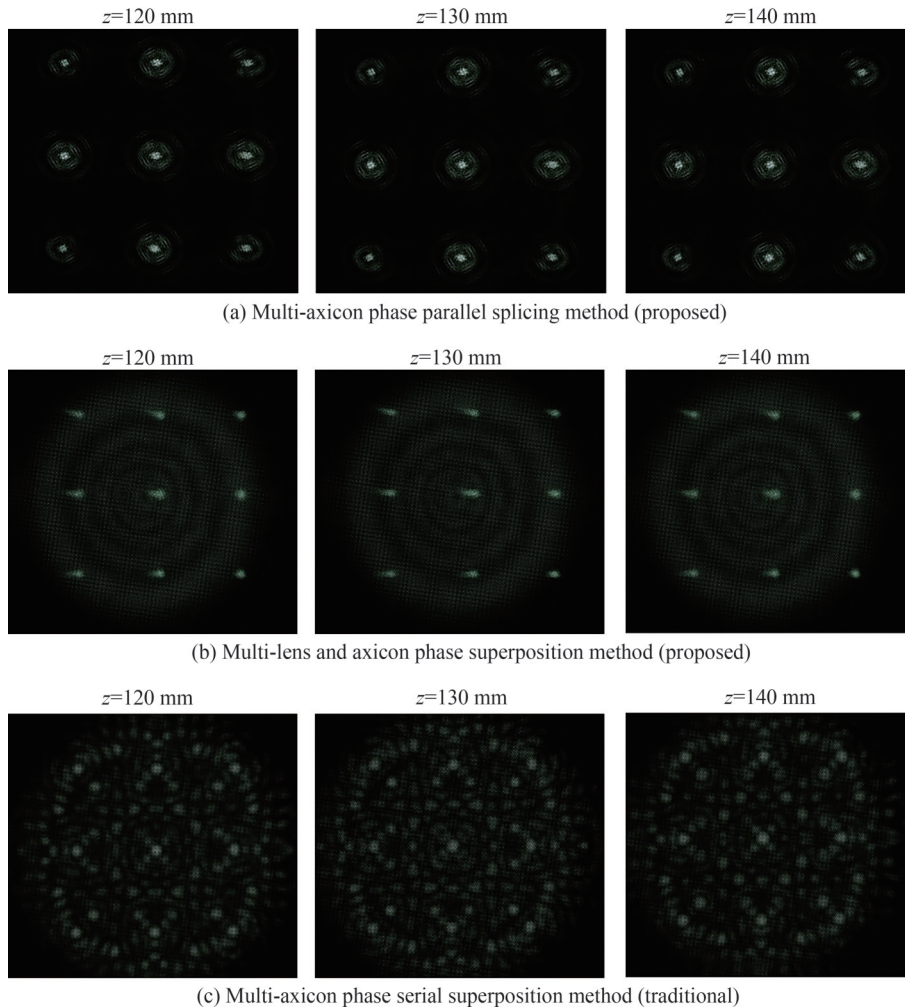


图11 实验光路

Fig.11 Experimental light path diagram

入射光束(波长520 nm)为高斯光束,经过准直扩束镜和光阑后,利用格兰棱镜调节激光偏振方向为水平,再照射到加载了全息图的空间光调制器上,实现对入射光的相位调制,最后通过一个 $4f$ 系统(焦距相同均为100 mm),用CCD在相应位置处接收,移动CCD,分别采集图像。相机采集的实验结果如图12所示。



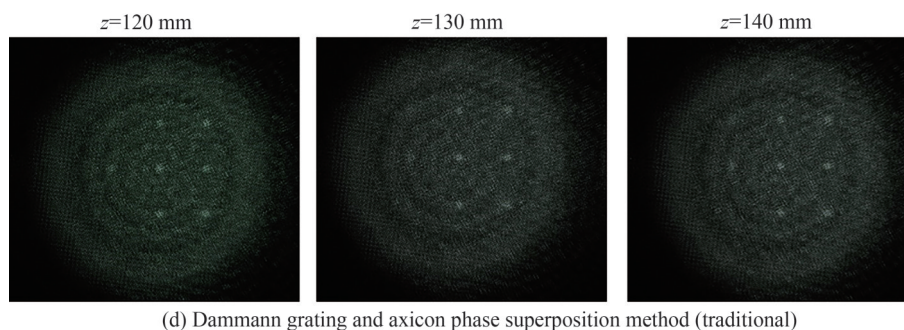


图12 所提方法和传统方法产生的贝塞尔光束阵列在沿传输方向120 mm、130 mm、140 mm位置处的实验结果  
Fig.12 The experimental results of Bessel beam array generated by the proposed method and the traditional method at 120 mm, 130 mm and 140 mm positions along the transmission direction

实验分别采集了所提方法和传统方法沿传输方向在120 mm、130 mm、140 mm位置的光场图像,实验结果与仿真结果保持一致,说明本文所提方法的有效性,即多轴锥透镜相位并行拼接法以及多透镜和轴锥透镜相位叠加法所产生的贝塞尔光束阵列有着更高的均匀性和信噪比。从平行贝塞尔光束阵列产生方法来看,多轴锥透镜相位并行拼接法比多轴锥透镜相位串行叠加法生成的光场质量更好;从发散贝塞尔光束阵列产生方法来看,多透镜和轴锥透镜相位叠加法比达曼光栅和轴锥透镜相位叠加法有更高能量利用率和更小的中心光斑直径。

## 4 结论

本文提出了两种方法产生高质量的贝塞尔光束阵列,分别是多轴锥透镜相位并行拼接法、多透镜和轴锥透镜相位叠加法,建立了所提方法的理论模型,并仿真模拟了所提方法和传统方法产生的 $3\times 3$ 贝塞尔光束阵列的衍射图样,对比分析了它们的光场质量。结果表明,相比于传统方法,本文所提方法产生的平行、发散贝塞尔光束阵列均匀性分别提高了2.97%和4.70%,衍射效率分别提高了48.22%和54.75%。通过实验采集了贝塞尔光束阵列沿传输方向不同位置的横向光场,与仿真结果一致。利用空间光调制器可编程的特性,可以便捷地调节贝塞尔光束的数量、间距和强度等参数,以满足实际应用的需求。

### 参考文献

- [1] DURNIN J, MICELI JR J J, EBERLY J H. Diffraction-free beams[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [2] SHIN H, KIM D. Strength of ultra-thin glass cut by internal scribing using a femtosecond Bessel beam[J]. *Optics and Laser Technology*, 2020, 129(4): 106307.
- [3] WANG Haoran, ZHANG Fan, DING Kaiwen, et al. Non-diffraction-length Bessel-beam femtosecond laser drilling of high-aspect-ratio microholes in PMMA[J]. *Optik*, 2021, 229(1): 166295.
- [4] SAHIN R, KABACELIK I. Nanostructuring of ITO thin films through femtosecond laser ablation[J]. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 2016, 122(4): 1-6.
- [5] HE Hongsen, REN Yuxuan, CHAN R K Y, et al. Background-free volumetric two-photon microscopy by side-lobes-cancelled Bessel beam[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 27(4): 1-7.
- [6] ZHOU Yuan, LI Runze, YU Xianghua, et al. Progress in study and application of optical field modulation technology based on liquid crystal spatial light modulators (invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 1123001.  
周源, 李润泽, 于湘华, 等. 基于液晶空间光调制器的光场调控技术及应用进展(特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(11): 1123001.
- [7] BOWMAN R, MULLER N, ZAMBRANA-PUYALTO X, et al. Efficient generation of Bessel beam arrays by means of an SLM[J]. *European Physical Journal: Special Topics*, 2011, 199(1): 159-166.
- [8] GARCIA-MARTINEZ P, SANCHEZ-LOPEZ M M, DAVIS J A, et al. Generation of Bessel beam arrays through Dammann gratings[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(9): 1375-1381.
- [9] CHEN Lei, KANWAL S, YU Binbin, et al. Generation of high-uniformity and high-resolution Bessel beam arrays through all-dielectric metasurfaces[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(5): 967-977.
- [10] CHEN Weiting, KHORASANINEJAD M, ZHU A Y, et al. Generation of wavelength-independent subwavelength Bessel beams using metasurfaces[J]. *Light: Science and Applications*, 2017, 6(5): e16259-e16259.
- [11] VASARA A, TURUNEN J, FRIBERG A T. Realization of general nondiffracting beams with computer-generated

- holograms[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1989, 6(11): 1748-1754.
- [12] LEONARDO R D, IANNI F, RUOCCO G. Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays[J]. Optics Express, 2007, 15(4): 1913-1922.

## High Quality Bessel Beam Array Generation Method Based on Computer Generated Holography

ZHANG Ruidi<sup>1,2</sup>, DUAN Yaxuan<sup>1,3</sup>, DA Zhengshang<sup>1,3</sup>

(1 *Advanced Optical Instrument Research Department, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3 *Xi'an Key Laboratory of High Power Laser Measurement Technology and Instruments, Xi'an 710119, China*)

**Abstract:** Bessel beam array has been widely used in femtosecond laser processing, particle capture, optical microscopy, optical communication, and other fields. Especially in the field of industrial processing, the Bessel beam plays an important role in the process of pore structures with the ratio of height to depth due to its long focal depth characteristics. For the preparation of large-area periodic pore micro-nano structures, the parallel processing method of the Bessel beam array can significantly improve the machining efficiency. The machining quality of materials is closely related to the quality of the light field of the Bessel beam array, so it is significant to study the generation method of Bessel beam array with high quality. The traditional Bessel beam array generation methods include: multi-axicon phase serial superposition method, Dammann grating, and axicon phase superposition method, which can generate parallel and divergent Bessel beam array, respectively. However, the generated Bessel beam array has problems of poor uniformity and low diffraction efficiency. Therefore, two computational holography methods are proposed in this paper, which can generate high-quality parallel and divergent Bessel beam arrays respectively. Firstly, the computational hologram model of the proposed method is established, and the multi-axicon phase parallel splicing method is proposed, which effectively reduce the background noise of the optical field by improving the "aperture utilization ratio" of the window; The multi-lens and axicon phase superposition method is proposed, the multi-lens phase superposition method is used to generate multiple focus distributions on the observation plane, and then the beams of each focus are modulated into Bessel beams by superimposing axicon phase, thus forming Bessel beam array, the key of this method is the multi-lens phase superposition to generate multi-focus distributions with controllable position. Secondly, holograms of a  $3\times 3$  Bessel beam array are generated by the proposed method and the traditional method, and then simulated respectively, the transverse optical field distribution and diffraction pattern of the Bessel beam array in free space are obtained, the uniformity and diffraction efficiency of the Bessel beam array generated by the proposed method and the traditional method are compared and analyzed. The simulation results show that the uniformity and diffraction efficiency of the parallel Bessel beam array generated by the proposed method are 98.94% and 78.12%, respectively; the uniformity and diffraction efficiency of the diverging Bessel beam array generated by the proposed method are 97.95% and 79.23%, respectively. Finally, the images of 120 mm, 130 mm and 140 mm along the transmission direction of Bessel beam array are collected through experiments, which are highly consistent with the simulation results. Compared with traditional methods, the uniformity of parallel and divergent Bessel beam arrays produced by the proposed method is increased by 2.97% and 4.70%, respectively, and the diffraction efficiency is increased by 48.22% and 54.75%. The method proposed in this paper provides a technical approach to the generation of high quality Bessel beam arrays and has certain engineering application value.

**Key words:** Bessel beam array; Spatial light modulator; Phase superposition method; Computer generated hologram; Femtosecond laser processing

**OCIS Codes:** 090.1760; 070.7145; 120.5060; 140.3300; 070.6120